

50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau
von Makro bis Nano /
Mechanical Engineering
from Macro to Nano**

Proceedings

Fakultät für Maschinenbau /
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Impressum

Herausgeber:	Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
Redaktion:	Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten Andrea Schneider Fakultät für Maschinenbau Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz, Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß, Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges, Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer, Dipl.-Ing. Silke Stauche
Redaktionsschluss: (CD-Rom-Ausgabe)	31. August 2005
Technische Realisierung: (CD-Rom-Ausgabe)	Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau Dipl.-Ing. Christian Weigel Dipl.-Ing. Helge Drumm Dipl.-Ing. Marco Albrecht
Technische Realisierung: (Online-Ausgabe)	Universitätsbibliothek Ilmenau ilmedia Postfach 10 05 65 98684 Ilmenau
Verlag:	 Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V. Werner-von-Siemens-Str. 16 98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe):	3-932633-98-9	(978-3-932633-98-0)
ISBN (CD-Rom-Ausgabe):	3-932633-99-7	(978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

R. Mikuta / C. Wennmacher / E. P. Burte

Sensor zur Messung der Windgeschwindigkeit mit digitalem Ausgangssignal

ABSTRACT

The contribution describes a digital sensor for the measurement of wind velocity and wind direction. The sensor is based on a hot-wire anemometer and the wires are arranged in the center of a substrate with low thermal conductivity. The heat flow towards the air direction is proportional the flow rate. For digitization two energy levels are defined, representing two different temperatures. The heat flow varies between these two temperatures within a defined time interval. The elapsed time between two turning points is measured and delivers the signal output. By periodic switch on and off, the heat flow develops a periodic digital signal.

Einleitung

Schalenanemometer finden zur Windgeschwindigkeitsmessung in der Gebäudeautomatisierung nach wie vor einen weit verbreiteten Einsatz. Sie zeichnen sich durch einen großen Messbereich aus, der ein lineares Verhalten zeigt. Der Verschleiß an den bewegten Teilen sowie die Vereisungsproblematik führten in letzter Zeit zu verstärkten Bemühungen, diese am Markt eingeführten Messmittel durch thermische Windgeschwindigkeitssensoren abzulösen. Sie nutzen eine Konstantspannungs- oder Konstantstromeinspeisung und besitzen infolge des großen Messbereichs von (0 ... 25) m/s eine prinzipbedingte nichtlineare Kennlinie [1].

Unverändert bleibt dieser nichtlineare Zusammenhang auch, wenn die Temperatur als Maß für die erforderliche Heizenergie konstant gehalten wird, der für diese Konstanthaltung erforderliche Heizstrom aber als funktionale Abbildung der Strömungsgeschwindigkeit dient [1].

In [2] wird eine spezielle Messanordnung beschrieben, die die Temperatur als Abbild der Heizenergie konstant hält und der Eintrag an elektrischer Leistung ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit ist. Da der Wärmefluss als Konvektion zwischen Heizer und Luftstrom (Wind) über die Wärmeübergangszahl α einen linearen Zusammenhang gemäß der Gleichung

$$\frac{dQ}{dt} = \dot{Q} = A_H \cdot \alpha(v) \cdot (\vartheta_H - \vartheta_{St}) \quad (1)$$

besitzt, wird nur durch die Abhängigkeit von $\alpha(v)$ selbst ein nichtlinearer Verlauf erzeugt (**Bild 1**). Er fällt aber bei Verwendung einer ebenen, polierten Konvektionsfläche verhältnismäßig gering aus,

wie es das **Bild 1** zeigt. Die Wärmeübergangszahl $\alpha(v)$ lässt sich in einer Potenzreihe 2. Ordnung sehr gut approximieren und in der allgemeinen Gleichung

$$\hat{\alpha}(v) = \hat{\alpha}_0 + \hat{\alpha}_1 \cdot v + \hat{\alpha}_2 \cdot v^2 \quad (2)$$

darstellen [3]. Aus diesem Grund soll in diesem Beitrag von der Wärmeübergangszahl gesprochen werden, sie sich aus den geschätzten Koeffizienten $\hat{\alpha}_0$, $\hat{\alpha}_1$ und $\hat{\alpha}_2$ der Gl. (2) errechnen lässt [3].

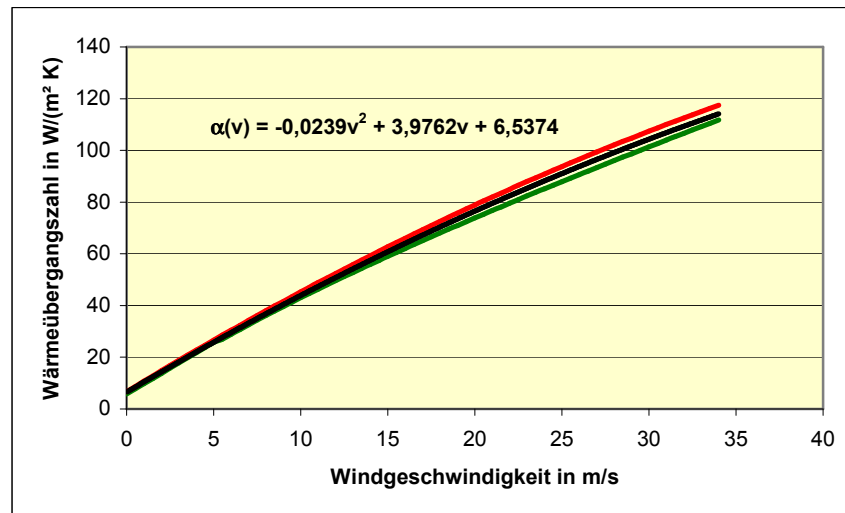


Bild 1: Mittlere Wärmeübergangszahl $\hat{\alpha}(v)$ in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit von Luft (Wind) über einer ebenen, polierten Konvektionsfläche im laminaren Strömungsfeld.

Die im **Bild 1** gezeigte untere Kurve beschreibt die Abhängigkeit der Wärmeübergangszahl ohne den Einfluss der Luftfeuchtigkeit. Sie beeinflusst aber die Wärmeleitfähigkeit der Luft und so auch den Wärmeübergang auf der Oberfläche des Heizers. In [1] werden die von Schubauer (1935) dazu mit einem Hitzdrahtanemometer im Windkanal durchgeführten Untersuchungen kurz beschrieben. Im Ergebnis zeigte er, dass bei einer Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit im Bereich von (25 ... 70) % r.F. eine um ca. 6 % höhere Strömungsgeschwindigkeit gemessen wird. Für die Abhängigkeit der Wärmeübergangszahl ist daraus zu schließen, dass durch ihre Erhöhung sich auch der Wärmefluss nach Gl. (1) erhöht. Es muss folglich ein höherer Heizstrom durch den Hitzdraht fließen, um die Temperatur des Hitzdrahtes konstant zu halten [1], so dass als Abbild des Heizstromes eine höhere Strömungsgeschwindigkeit angezeigt wird. Berücksichtigt man diesen Zusammenhang in der grafischen Darstellung des **Bildes 1**, so führt das zu der oberen Kurve. In der Umgebung des Heizers gestaltet sich die Messung der Luftfeuchtigkeit sehr schwierig, weil sie sich infolge des Wärmeflusses ändert. Es muss an dieser Stelle hypothetisch angenommen werden, dass durch die Strömungsverhältnisse an der Oberfläche des Heizers sowie des Wärmeflusses von seiner Oberfläche in die Strömung hinein, die relative Luftfeuchtigkeit immer unter der Sättigungsfeuchte (< 100 % r.F.) liegen wird. Aus dieser Bedingung kann eine mittlere Wärmeübergangszahl $\hat{\alpha}(v)$

ermittelt werden, die zwischen den beiden Kurven liegt und im **Bild 1** als ausgleichende Kurve eingezeichnet ist [3]. Der Einfluss der nicht erfassten relativen Luftfeuchtigkeit auf die Wärmeübergangszahl führt so zu einem nichterfassbaren systematischen Fehleranteil, der zur Vergrößerung der Messunsicherheit beiträgt.

Die zugehörigen geschätzten Koeffizienten [3] der mittleren Wärmeübergangszahl $\hat{\alpha}(v)$ können dem **Bild 1** entnommen werden, die in Gestalt der Gl. (2) formal in Gl. (1) eingesetzt werden kann, die dann den durch Konvektion bestimmten mittleren Wärmefluss beschreibt.

Messprinzip

Das Messprinzip basiert auf dem des klassischen Hitzdrahtanemometers [1]. Aus Gründen der mechanischen Stabilität wird der Draht auf einem Substrat geringer Wärmeleitfähigkeit als ebene zirkulare, bifilare Wendel aufgebracht, was im **Bild 2** nur schematisch dargestellt ist. Infolge der Konvektion an seiner ebenen Fläche entsteht ein Wärmestrom \dot{Q} in die vorbei geleitete Luftströmung (Wind). Dabei wird die Heizleistung in den Heizer hinein konstant gehalten. Die durch die Luftströmung abgeführte Wärmeenergie wird durch eine höhere elektrische Leistung im Heizer ausgeglichen und sie ist so ein Maß für die Geschwindigkeit der Luftströmung (Windgeschwindigkeit).

Formt man nun die Gl. (1) etwas um, so ist zu erkennen, dass bei einer hohen Temperaturdifferenz zwischen Heizer und Luftströmung nur noch die Heizertemperatur dominant ist und die Gl. (1) geht in die einfache Form

$$\frac{dQ}{dt} = \dot{Q} \approx A_H \cdot \hat{\alpha}(v) \cdot \vartheta_H \quad \text{unter der Randbedingung} \quad \left(1 - \frac{\vartheta_{St}}{\vartheta_H}\right) \approx 1 \quad (3)$$

über. Unter dieser Bedingung ist die Messung der Strömungstemperatur für das Messprinzip nicht mehr erforderlich und es genügt die Heizertemperatur, die auf einem Wert über der Strömungstemperatur konstant zu halten ist. Die im Zentrum des Windsensors befindliche Heizwendel wird sowohl zum Heizen als auch zur Messung der Heizertemperatur als Abbild des Wärmeflusses \dot{Q} benutzt (**Bild 2**).

Ein digitales Ausgangssignal der Messanordnung wird dadurch erreicht, indem der bisherige konstante Energiezustand des Heizers (analoge Größe) durch zwei unterschiedliche Energieniveaus ersetzt wird, einem unteren und einem oberen. Diese beiden Energiezustände sind so ausgelegt, dass sie durch ein Zeitintervall voneinander getrennt sind. Unter Nutzung des in Gl. (3) gezeigten Zusammenhangs dient hier wieder die Temperatur als Abbild der beiden Energiezustände in Form

einer unteren und einer oberen Temperatur des Heizers. Dabei charakterisiert die obere Heizertemperatur ϑ_o einen Aufheizvorgang und die untere ϑ_u den anschließende Abkühlprozess. Die Zeit als quantisierende Größe, die zwischen diesen beiden Energiezuständen verstreicht, ist nun das Abbild der Windgeschwindigkeit und wird als Zählgröße $Z(v)$ registriert. Da sich dieser Vorgang nach der Abkühlung auf ϑ_u periodisch wiederholt, kann die Messung der Windgeschwindigkeit auf eine Frequenz- oder Periodendauermessung zurückgeführt werden. Ein ähnliches Prinzip wird auch in [4] beschrieben.



Bild 2: Prinzipieller Aufbau (links) und realisierter Windsensor in einem Gehäuse einer Wetterstation im demontierten Zustand (rechts).

Die Bewegung einer physikalischen Größe zwischen zwei Grenzwerten mit einer definierten Hysterese von beispielsweise $\Delta\vartheta_{Hy} = \vartheta_o - \vartheta_u$ ist aus der Regelungstechnik als Zweipunktverhalten eines Reglers allgemein bekannt. An der unteren Grenze ϑ_u (unteres Energieniveau) wird der Heizstrom I_H eingeschaltet und an der oberen ϑ_o (oberes Energieniveau) wieder abgeschaltet. Analytisch kann dieser Sachverhalt anhand thermodynamischer Übergangsvorgänge in Form der Differentialgleichung

$$P_H = m \cdot c \cdot \frac{d\vartheta_H}{dt} + \hat{\alpha} \cdot A_K \cdot \vartheta_H \quad (4)$$

beschrieben werden. Dabei ist m die thermodynamisch wirksame Masse und die Größe c die wirksame spezifische Wärmekapazität der aus Heizer und Substrat bestehenden Verbundeinheit. Dieser Übergang auf eine effektive Wirkung ist im konstruktiven Aufbau des Sensors bedingt, da sich infolge des Wärmeflusses innerhalb des Substrates keine geometrische Abgrenzung der Konvektionsfläche beschreiben lässt. Aus diesem Grund erfolgt auch hier der Übergang von der Heizfläche A_H der Gl. (1) in eine effektive Konvektionsfläche A_K der Gl (4). Die Lösung der Differentialgleichung (4) liefert unter der Randbedingung eines periodischen Ausgangssignals $\vartheta_H(t=0) = \vartheta_u$ die Sprungantwortfunktion der Heizertemperatur ϑ_H infolge einer eingprägten Leistung

$$\vartheta_H(t) = \hat{\vartheta}_0(v) \cdot \left(1 - \frac{\hat{\vartheta}_0(v) - \vartheta_u}{\hat{\vartheta}_0(v)} \cdot e^{-\frac{t}{T_0(v)}} \right), \quad (5)$$

wobei die Zeitkonstante mit $T_0 = \frac{1}{\hat{\alpha}(v)} \cdot \frac{m \cdot c}{A_K}$ und die erreichbare maximale Temperatur mit

$\hat{\vartheta}_0 = \frac{1}{\hat{\alpha}(v)} \cdot \frac{P_H}{A_K}$ definiert wird. Die Größe $\hat{\vartheta}_0$ ist in der Gl. (5) die Temperatur, die mit der

eingespeisten Leistung von $P_H = I_H^2 \cdot R_H$ höchstens erreicht wird. Auf Grund des Aufbaus des Windsensors wird dieser Wert allerdings nicht erreicht, da in der Gl. (4) die bei höheren Temperaturen zunehmend wirksam werdende Strahlung unberücksichtigt bleibt. Gleiches trifft auf die infolge der Wärmeleitung ins Substrat abgeführte Wärmeenergie zu, eine Tatsache, die in weiteren Untersuchungen eingehender zu betrachten ist.

Die Gl. (4) berücksichtigt nur den eingeschwungenen Zustand der Zweipunktregelung. Im Einschaltmoment des Windsensors ist als Randbedingung zur Lösung der Differentialgleichung die Lufttemperatur ϑ_w einzusetzen. Da in den Betrachtungen vom eingeschwungenen periodischen Schaltverhalten ausgegangen wird, soll in den weiteren Betrachtungen dieses Einschaltverhalten unberücksichtigt bleiben. Mit der Wärmeübergangszahl $\hat{\alpha}(v)$ geht die Windgeschwindigkeit v sowohl in die Zeitkonstante T_0 als auch in die Größe $\hat{\vartheta}_0$ ein. Aus der Gl. (5) kann nun durch Umstellen und Umformung die Aufheizzeit als

$$t_1 = \frac{1}{\hat{\alpha}(v)} \cdot \frac{m \cdot c}{A_K} \cdot \ln \left(\frac{\hat{\vartheta}_0(v) - \vartheta_u}{\hat{\vartheta}_0(v) - \vartheta_o} \right) \quad (6)$$

berechnet werden, in der die Heizertemperatur die Hysterese $\Delta\vartheta_{Hy}$ von der unteren beginnend zur oberen Grenztemperatur hin durchläuft. Der Heizer ist eingeschaltet.

Mit dem Erreichen der oberen Grenztemperatur ϑ_o wird der Heizer abgeschaltet und er verbleibt bis zur Erreichung des unteren Grenzwertes ϑ_u in diesem Zustand. Danach erfolgt ein weiterer Heizzyklus, so dass auf diese Weise ein periodisches Signal entsteht. Da in der Abkühlphase keine Heizleistung eingespeist wird, nimmt die Gl (4) die Form

$$0 = m \cdot c \cdot \frac{d\vartheta_H}{dt} + \hat{\alpha} \cdot A_K \cdot \vartheta_H \quad (7)$$

an. Unter Einbeziehung der Randbedingung, dass im Abschaltmoment der obere Grenzwert ϑ_o erreicht wurde, erhält man als Lösung

$$\vartheta_H(t) = \vartheta_o \cdot e^{-\frac{1}{T_0} \cdot t}. \quad (8)$$

Beim Abkühlvorgang ist also nur noch die Zeitkonstante T_0 von der Windgeschwindigkeit abhängig. Aus der Bedingung, dass an der unteren Grenztemperatur ϑ_u der Heizer wieder eingeschaltet wird und der Abkühlvorgang damit beendet ist, ergibt sich mit

$$t_2 = \frac{1}{\hat{\alpha}(v)} \cdot \frac{m \cdot c}{A_K} \cdot \ln \frac{\vartheta_o}{\vartheta_u} \quad (9)$$

die Zeit, in der die Schalthysterese $\Delta\vartheta_{Hy}$ in Richtung des unteren Grenzwertes durchlaufen wird. Die Periodendauer T ergibt sich schließlich als Summe der Pulsdauer t_1 (Heizer eingeschaltet) und der Pulslücke t_2 (Heizer ausgeschaltet). Im nachfolgenden **Bild 3** ist die Pulsdauer t_1 und die Periodendauer T grafisch gegenübergestellt.

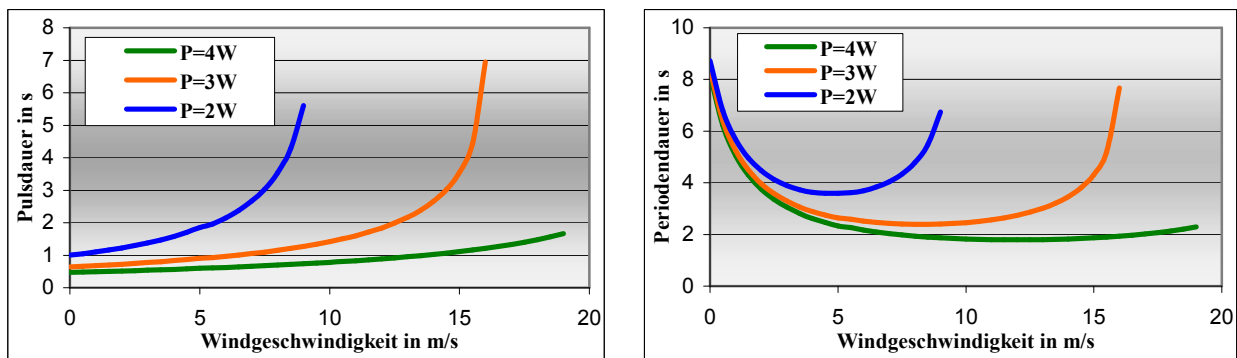


Bild 3: Pulsdauer t_1 (links) und Periodendauer T (rechts) in Abhängigkeit der den Heizer eingespeisten effektiven elektrischen Leistung von 2 W, 3 W und 4 W.

Der Vergleich zeigt augenscheinlich, dass die Auswertung der Periodendauer als Abbild der Windgeschwindigkeit ungeeignet ist. Vielmehr ist es die Pulsdauer t_1 , die bei höheren Heizleistungen dafür benutzt werden muss.

Werden externe Temperatursensoren gemäß **Bild 2** in den Hautachsen der Windrichtung angeordnet, kann auch die Windrichtung infolge des Wärmetransports durch die Luftströmung erfasst werden. Wird in diesem Fall die Strömungstemperatur ϑ_{St} mit dem in Strömungsrichtung hinter dem Heizer gelegen Temperatursensor ϑ_{Fi} erfasst, so nimmt die Gl. (1) die Form

$$\frac{dQ_{Fi}}{dt} = \dot{Q}_{Fi} = A_{Fi} \cdot \hat{\alpha}(v) \cdot (\vartheta_{St} - \vartheta_{Fi}) \quad (10)$$

an, wobei hier der Wärmefluss \dot{Q}_{Fi} in Richtung des jeweiligen Temperatursensors i gerichtet ist. Die Windrichtung wird als analoge Größe aus der Temperaturdifferenz zweier Temperatursensoren in der jeweiligen Hauptrichtung ermittelt und ist nun durch die Temperaturerhöhung der Strömung über dem Heizer charakterisiert.

Funktionsweise des Windsensors

Zur Realisierung dieses Funktionsprinzips können zwei Wege beschritten werden. Einer besteht darin, dass der für den Zweipunktregler erforderliche Temperaturfühler thermisch mit dem Heizer verbunden wird. Praktisch zeigten sich aber genau hier Probleme technologischer Art. Deshalb wurde ein andere Weg erfolgreich beschritten, indem der Heizer selbst auch als Temperaturfühler verwendet wird. Die damit verbundene elektronische Schaltung wird zwar etwas aufwendiger, weil ein Heiz- und ein Messtakt realisiert werden muss, wodurch aber die schwierige thermische Kopplung von Heizer und Temperaturfühler vermieden wird. Die zugehörige Prinzipschaltung zeigt das **Bild 4**.

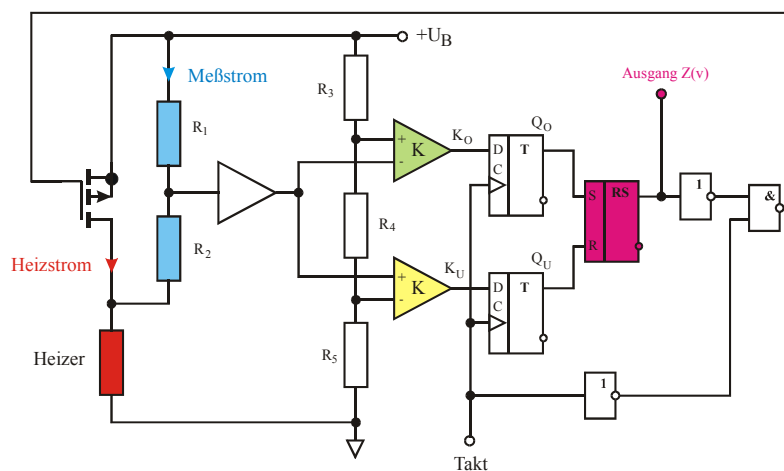


Bild 4: Prinzipschaltung des Windgeschwindigkeitssensors mit frequenzproportionalem Ausgangssignal.

Das Umschalten zwischen Heiz- und Messstrom erfolgt mit einem MOSFET, der direkt aus dem Logikschaltkreis angesteuert wird. Das verstärkte Messsignal, welches Abbild der Heizertemperatur ist, gelangt auf einen Präzisions-Schmitt-Trigger [5], der aus den beiden Komparatoren K_0 und K_U sowie dem RS-Flip-Flop besteht. Die beiden zwischengeschalteten D-Flip-Flops haben die Aufgabe, immer dann den Komparatorzustand zu halten (speichern), wenn der Heizstrom fließt. Um die Heizleistung hoch zu halten, liegt über dem Heizer in diesem Betriebszustand fast die gesamte Betriebsspannung an, so dass am Verstärkerausgang ebenfalls die Betriebsspannung U_B anliegt. Dadurch ändern sich zwangsläufig die Komparatorzustände. Erst im nachfolgenden Messtakt wird eine möglicherweise erfolgte Zustandsänderung durch die D-Flip-Flops übernommen [6].

Durch diese Arbeitsweise wird der Einfluss des Heizstromes auf die Temperaturmessung ausgeschaltet. Am Ausgang $Z(v)$ wird auf diese Weise immer nur das Schaltverhalten von der Hysterese $\Delta\vartheta_{Hy}$ bestimmt. Die Pulsdauer t_1 als auch die Periodendauer T stehen dabei in direkter Abhängigkeit mit der zu messenden Windgeschwindigkeit, wobei eben der Auswertung der Pulsdauer t_1 der Vorzug zu geben ist (**Bild 3**).

Bedingt durch die Betriebsspannung, den Heizwiderstand und seine Geometrie sowie dem Material des Heizwiderstandes ist die Heizleistung auf eine bestimmte Größe beschränkt, so dass jeder Heizleistung eine Windgeschwindigkeit zugeordnet werden kann, bei der die obere Grenztemperatur ϑ_0 nicht mehr erreicht wird. Der Heizer schaltet dann nicht mehr ab und das Ausgangssignal $Z(v)$ verharrt im Zustand logisch 1. Bei Windstille ($v = 0 \text{ m/s}$) bleibt dagegen das Ausgangssignal $Z(v)$ auf dem Zustand logisch 0 stehen, der Heizer bleibt dann abgeschaltet. Durch Auswertung dieser Schaltzustände können diese beiden Grenzzustände sehr einfach erkannt werden.

Praktische Ausführung des Windsensors

Die Grundlage für die Messung der Windgeschwindigkeit ist das Messprinzip nach **Bild 4**. Seine schaltungstechnische Umsetzung zeigt das **Bild 5**. Man findet die funktionsbestimmenden Baugruppen in dieser Schaltungsanordnung wieder. Ergänzt wurde in der Schaltung eine Selbststarteinrichtung, um im Einschaltmoment oder nach einem Spannungsausfall definierte Anfangsbedingungen zu erhalten. Das betrifft vorrangig die bistabilen Kippstufen. Durch das Setzen von $D_{3,1}$ und das Rücksetzen von $D_{3,2}$ wird ein „verbotener“ Zustand des RS-Flip-Flop verhindert, das aus den beiden NAND-Gattern $D_{4,3}$ und $D_{4,4}$ besteht. Der logische Zustand bewirkt das Einschalten des Heizers und im anschließenden Messtakt wird dieser Anfangszustand gegebenenfalls korrigiert.

Die gesamte Schaltung ist im digitalen Teil taktflankengetriggert, wodurch die Störsicherheit gegen Störimpulse gegenüber einer zustandsgesteuerten Logik deutlich verbessert wird. Eine Erweiterung gegenüber der Prinzipschaltung im **Bild 4** erfuhr auch der Taktgenerator, der nun zwei um 90° phasenverschobene Taktsignale liefert. Dadurch wird erreicht, dass nicht gleichzeitig vom Heiz- auf den Messstrom umgeschaltet wird. Während des Heiztakts befindet sich der Operationsverstärker $V_{1,3}$ in der Sättigung, weil fast die gesamte Betriebsspannung über dem Heizwiderstand abfällt. Dadurch benötigt er eine gewisse Zeit, um nach dem Umschalten wieder in seinen Arbeitspunkt zurückzukehren. Die geringere Taktlaufzeit der logischen Bauelemente gegenüber der deutlich längeren „Erholungszeit“ des Operationsverstärkers reicht aber aus, um von den Komparatoren K_o und K_u mit der aufsteigenden Flanke den Zustand logisch 1 und logisch 0 in die folgenden D-Flip-Flops $D_{3,1}$ und $D_{3,2}$ zu übernehmen. Der Heizer hätte dann immer den oberen Grenzwert der Temperatur erreicht und bliebe ausgeschaltet. Mit der nachfolgenden Taktflanke wird dieser fehlerhafte Zustand zwar wieder beseitigt, aber mit dem nächsten Heiztakt wird der alte fehlerhafte Zustand wieder herzustellen. Wird nun die 0-1-Flanke des Mess- und Heiztaktes um 90° phasenverschoben bzw. verzögert, ist dieses Verhalten beseitigt.

Das Impulsdiagramm des realisierten Windgeschwindigkeitssensors (**Bild 6**) berücksichtigt aus Gründen der Anschaulichkeit diese Phasenverschiebung und die Verwendung der beiden phasenverschobenen Taktsignale nicht. Das Diagramm verdeutlicht die Änderung der Pulsdauer bzw. der Periodendauer infolge der Windgeschwindigkeitsänderung, so wie es auch im Experiment nachgewiesen werden konnte, auch wenn der Verlauf der Heizertemperatur im **Bild 6** durch Geraden angenähert wurde.

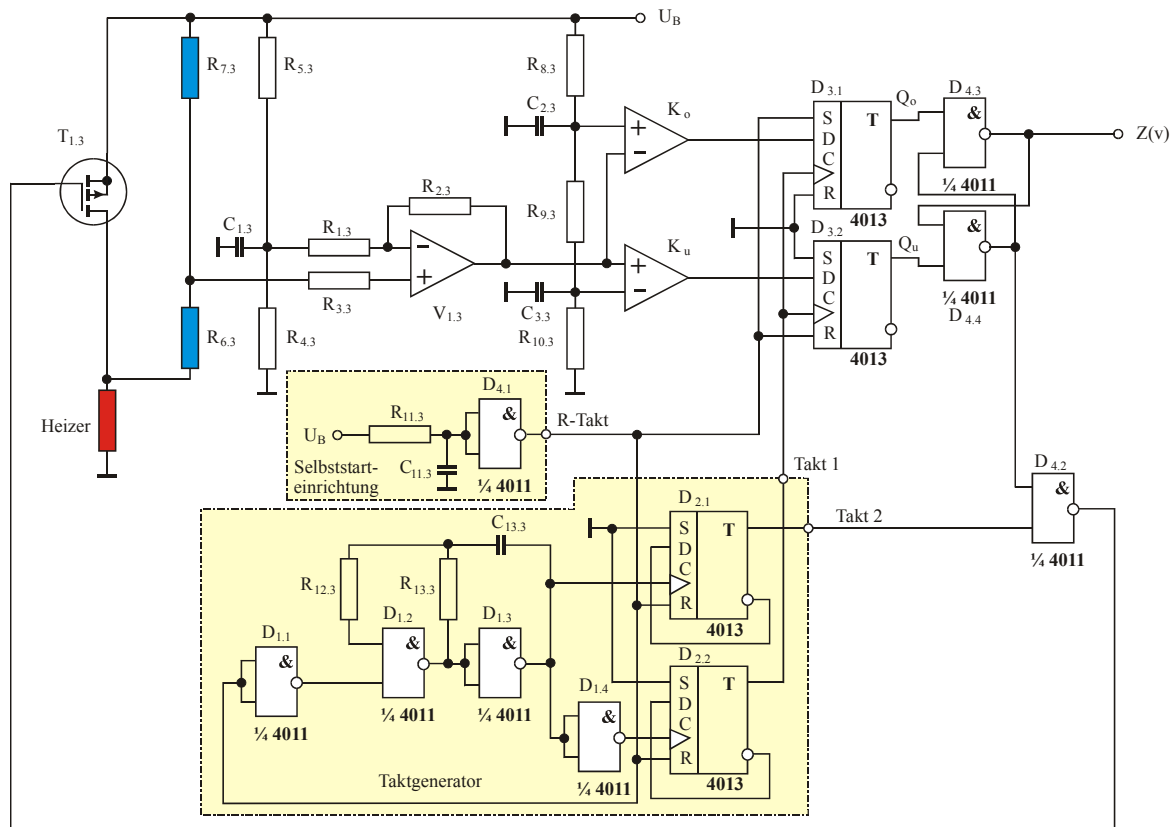


Bild 5: Schaltung zur Windgeschwindigkeitsmessung mit digitalem Informationsparameter $Z(v)$.

Im Zusammenhang mit der Gestaltung des Heizers war die Wärmeabgabe an die vorbeiströmende Luft zu lösen. Als Trägermaterial fand hitzebeständiges Leiterkartenmaterial auf Glasfaserbasis im Funktionsmuster seinen Einsatz. Mit einem Spitzenstrom von 850 mA, einem Heizwiderstand von ca. 5Ω sowie einem Tastverhältnis von 1:1 (**Bild 6** – Heizstrom) konnte eine effektive Heizleistung von ca. 2,0 W erreicht werden. Die Versuche zeigten bald, dass die Wärmeleitfähigkeit des Leiterkartenmaterials noch zu groß ist, um den Wärmeabfluss vom Heizer in das Material zu verhindern, so dass die Gl. (4) nur stark eingeschränkt galt. Erst die Nutzung der Verlustleistung des Leistungsschalters $T_{1.3}$ brachte eine maßgebliche Verbesserung der Messempfindlichkeit des Sensors. Als SMD-Ausführung wurde der Leistungsschalter $T_{1.3}$ auf der Unterseite der Heizerplatine, unterhalb der Heizwendel angeordnet. Die Verlustleistung erwärmt die Unterseite der Platine im Bereich des Heizers, so dass jetzt ein großer Teil der Heizleistung des Heizers in die

vorbeziehende Luftströmung abgegeben wird und zunehmend die Konvektion über dem Heizer wirksam wird. Das gleiche Ergebnis kann auch mit einem separaten Heizer auf der Gegenseite des Heizers erreicht werden, der aber zusätzlich Energie benötigt. Damit die Gültigkeit der Gl. (4) erfüllt ist, muss die Wärmeableitung durch einen kompensierenden Wärmefluss verhindert werden. Die Nutzung der Verlustleistung des Schalttransistors $T_{1,3}$ ist eine praktische Lösung aber eben nur ein Kompromiss auf dem Weg zur Herstellung der Gültigkeit der Differentialgleichung Gl. (4).

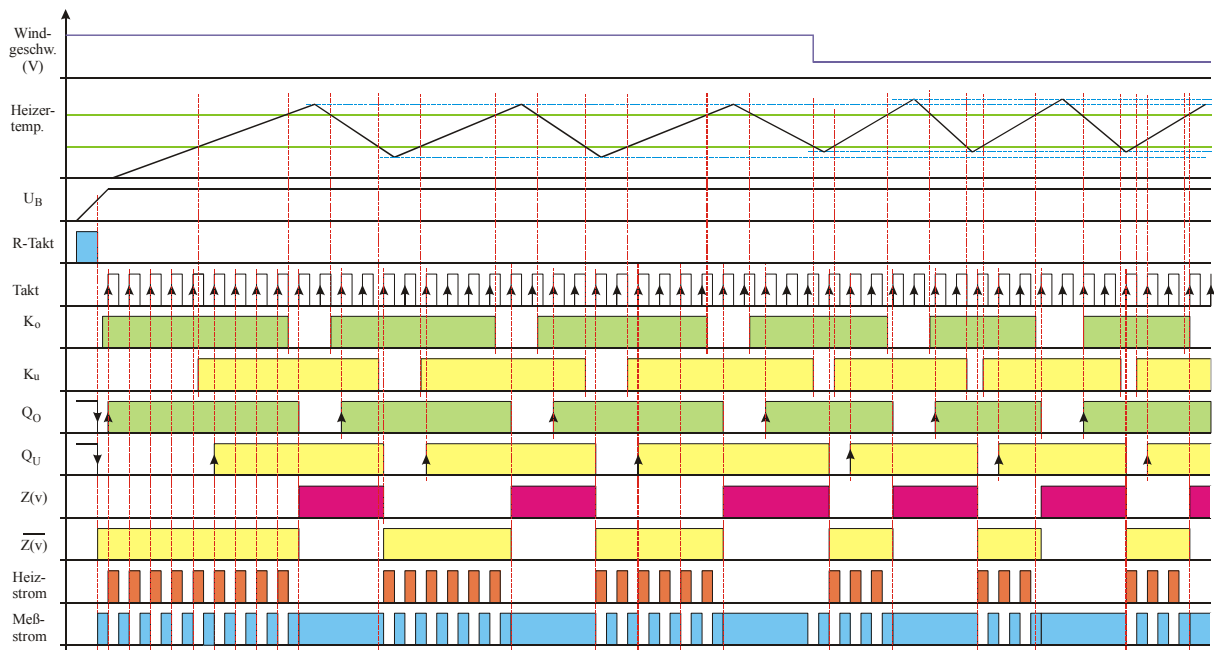


Bild 6: Impulsdiagramm des realisierten Windgeschwindigkeitssensors.

Um die Messempfindlichkeit des Windgeschwindigkeitssensors noch weiter zu erhöhen, kann der Heizer vom Rest der Platine abgelöst werden. Er ist nur noch an den Ecken über schmale Stege mit der ihn umgebenden Platine verbunden. Die in Zwischenraum verbleibende Luft verringert als schlechter Wärmeleiter so merklich den Wärmefluss. Ein Wärmeabfluss ist nur noch über diese dünnen Stege möglich. Auf diese Weise kann der thermische Widerstand der Wärmeleitung deutlich vergrößert werden. Erhöht man diesen thermischen Widerstand soweit, dass er gegenüber dem der Konvektion deutlich größer ausfällt, ist nur noch die Konvektion signifikant und es ist die Gültigkeit der Gl. (4) praktisch wieder hergestellt.

Der Nachteil einer solchen Lösung ergibt sich aber aus dem praktischen Einsatz eines solchen Windgeschwindigkeitssensors in einer Wetterstation (**Bild 2** – rechts). Da der Sensor oberhalb angeordnet ist, um der zu messenden Luftströmung (Wind) ausgesetzt zu sein, so dringt eben Regenwasser und Feuchtigkeit durch diese Öffnungen in das Gehäuse ein. Das Verschließen dieser Öffnungen (Schlitze) führt aber wieder zur Verschlechterung der Konvektionsbedingungen infolge der sich verbessernden Wärmeleitung in der Umgebung des Heizers.

Zusammenfassung und Ausblick

Das **Bild 7** fasst die Messergebnisse in Vergleich mit den auf der Basis der Gl. (6) berechneten Pulsdauer t_1 zusammen. Der Startpunkt für die Berechnung wurde auf die Windgeschwindigkeit von 0 m/s festgelegt. Der zugehörige Messwert wird dazu genutzt, die effektiv wirksame Masse m des Heizers und seine effektive spezifische Wärmekapazität c zu bestimmen. Auf Grund der verfügbaren Ausrüstung beschränkten sich die Untersuchungen auf einen Messbereich von (0 ... 4,3) m/s.

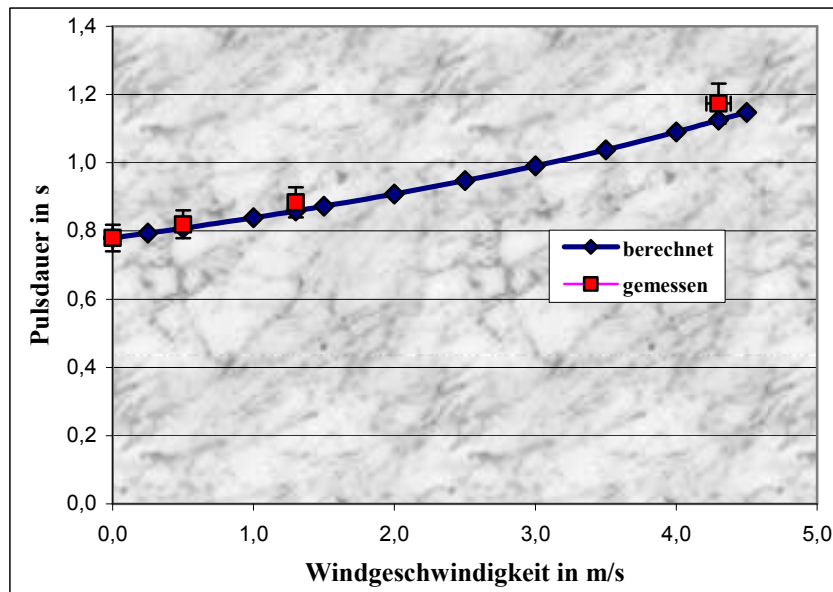


Bild 7: Vergleichende Darstellung der gemessenen Pulsdauer t_1 mit der der Modellrechnung nach Gl. (6). Die Messunsicherheit der dargestellten Messwerte der Pulsdauer t_1 liegt bei $\pm 5\%$.

Es zeigte sich, wie in **Bild 7** nachvollziehbar, dass mit wachsender Windgeschwindigkeit v die Pulsdauer t_1 oberhalb der berechneten liegt. Die Bedingungen für die Lösung der DGL (4) werden hier zunehmend schlechter erfüllt. Der Wärmefluss infolge der Wärmeleitung erwärmt die Trägerplatine, die selbst dem Luftstrom ausgesetzt ist und so als zusätzliche Konvektionsfläche wirksam ist. Diese Vergrößerung der Konvektionsfläche bewirkt wiederum eine Verringerung von $\hat{\vartheta}_0$ und führt schließlich dazu, dass $\hat{\vartheta}_0$ in Gl. (6) für eine bestimmte Wärmeübergangszahl $\hat{\alpha}(v)$ nicht konstant ist und so eine Verlängerung der Pulsdauer die Folge ist. Der Wert der Zeitkonstante T_0 in Gl. (6) ändert sich dabei insofern nicht, weil die effektive Masse m über die Materialdicke und das Volumen bestimmt ist, das sich wiederum aus der effektiven Materialdicke des Heizers über der Konvektionsfläche ergibt, so dass die Konvektionsfläche A_K in der Zeitkonstante T_0 unwirksam ist. Infolge dieser Erscheinung entsteht eine stärkere nichtlineare statische Übertragungsgleichung des Windgeschwindigkeitssensors als in den Berechnungen ausgewiesen.

Die mechanisch sehr stabile und robuste Ausführung des Windsensors konnte in den messtechnischen Untersuchungen die Funktionstüchtigkeit des Messprinzips zur Erfassung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung bis ca. 5 m/s nachweisen. Die Unzulänglichkeiten, die sich aus der Art des konstruktiven Aufbaus ergaben, können durch Gestaltungsänderungen beseitigt werden. Auch können die innerhalb des Substrat entstehenden Wärmeflüsse durch gestaltende Maßnahmen deutlich reduziert werden. Hier bieten Technologien der Mikrosystemtechnik eine Reihe von Möglichkeiten, die neben der Verkleinerung der Strukturen des Sensors selbst auch eine deutliche Reduktion der inneren Wärmeströme erlauben, wenn man hier die Gestaltung dünner Materialquerschnitte in Betracht zieht.

Das diesem Beitrag zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des BMBF (16SV923/0) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Literatur- bzw. Quellenhinweise:

- [1] Lomas, Charles G.: Fundamentals of Hot Wire Anemometry. Cambridge, London, New York: Cambridge University Press, 1986.
- [2] Liedtke, Günther: Temperaturregler. Patentschrift DE 4130513 C2. München: Deutsches Patentamt, 1993.
- [3] Wernstedt, Jürgen: Experimentelle Prozessanalyse. 1. Auflage, Berlin: Verlag Technik, 1989.
- [4] Kim, J.; Kensall, K. D.: Electrothermal oscillator for film-thickness monitoring. Sensors and Actuators, pp. 56-62, A 66, 1998.
- [5] Seifert, Manfred: Analoge Schaltungen. Verlag Technik. Berlin, 1987.
- [6] Seifert, Manfred; Beikirch, Helmut: Digitale Schaltungen und Schaltkreise. R. Oldenbourg-Verlag. München, Wien, 2001.

Autorenangaben:

Dr.-Ing. Reinhard Mikuta
Dipl.-Phys. Christian Wennmacher
Prof. Dr.-Ing. Edmund P. Burte
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Universitätsplatz 2
D-39106, Magdeburg
Tel.: (0391) 67 18398
Fax: (0391) 67 12103
E-mail: reinhard.mikuta@e-technik.uni-magdeburg.de